

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(7), 619-625(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.7.619

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

오픈형 스월 인젝터의 스월 챔버 형상 변화에 따른 동특성 연구

김현태*, 정연재*, 정석규*, 윤영빈**

Study on the Dynamic Characteristics of Open Type Swirl Injector with Varying Swirl Chamber Geometry

Hyuntae Kim*, Yunjae Chung*, Seokkyu Jeong* and Youngbin Yoon**

Seoul National University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering* , **

ABSTRACT

Swirl injectors are widely used for Liquid Rocket Engine(LRE) as fuel injection system and following researches are also being carried out throughout the world. Especially, solving combustion instability problem is essential for every type of LREs.

In this study, cold test was carried out for open type swirl injector as a fundamental research to solve combustion instability problem. Pressure fluctuation was applied to the inlet flow coming into the injector and the following response characteristics were observed. The effect of swirl chamber geometry was also studied by changing both swirl chamber length and diameter.

초 록

스월 인젝터는 액체로켓 엔진에서의 연료 분사 장치로 널리 사용되고 있으며, 이에 따른 연구 또한 활발하게 진행되고 있다. 특히 연소 불안정 문제를 해결하는 것은 모든 종류의 액체로켓 엔진에서 필수적이다.

본 연구에서는 연소불안정을 해결하기 위한 기초 연구로 오픈형 스월 인젝터에 대한 수류실험을 수행하였다. 인젝터로 유입되는 작동유체에 압력 섭동을 발생시키고, 그에 따른 응답특성을 실험적으로 파악하였다. 또한, 인젝터 스월 챔버의 길이와 지름을 변화시킴으로써 인젝터 구조의 변화에 따른 응답 특성의 변화를 확인하였다.

Key Words : Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Injector Dynamics(인젝터 동특성), Open type swirl injector(오픈형 스월 인젝터), Combustion instability(연소불안정)

1. 서 론

액체로켓엔진에서 발생하는 연소불안정은 작게는 연소 효율을 떨어뜨리고 크게는 엔진을 파

손하는 치명적인 문제를 야기한다. 액체로켓엔진 개발 초기부터, Saturn 로켓의 F-1 엔진 개발과정에서도 연소불안정은 주요한 문제 중 하나였으며, Baffle이나 Acoustic Cavity 등의 장치를 이

† Received : July 22, 2014 Revised : June 17, 2015 Accepted : June 22, 2015

** Corresponding author, E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

용하여 연소불안정을 억제하였다[1,2]. 그러나 이러한 억제장치를 설치하기 위해서는 연소기의 헤드나 챔버의 형상을 변경해야 하고, 제작이 복잡해지기 때문에 제작비용을 증가시킬 뿐 아니라 무게 또한 증가시켜 효율을 감소시키는 단점이 있다. 따라서 근본적으로 연소불안정을 일으키는 원인을 찾아 제거하는 것이 기술적으로나 비용적으로나 효과적이고, 이를 위해 연료 분사 시스템에 관련한 동특성 연구는 필수적이다.

이러한 중요성에도 불구하고 액체로켓엔진의 동특성 연구는 비교적 최근부터 시작되었다. D. Heister 등은 2000년대 이후부터 스월 인젝터의 동특성에 대한 수치해석 연구를 수행해왔으며, 최근 Close-Type 스월 인젝터의 동특성에 대하여 실험적 연구를 수행하였다[3]. W. Anderson 등은 기체중심 동축형 스월 인젝터에 대하여 연소 불안정이 발생할 때의 화염 형상을 실험적으로 계측하였다[4,5]. 그들은 실험을 통해 특정 형상의 인젝터 및 연소기의 불안정 특성을 파악하고, 실제 엔진 제작에 응용될 수 있는 데이터를 제공하였다. 또한 Bazarov 등은 다년간의 실험 결과를 바탕으로 스월 인젝터의 동특성과 Self-Oscillation에 대한 이론을 정립한 바 있다[6]. 국내에서는 길 등이 Close-Type 단일 스월 인젝터의 동특성에 대한 연구를 최근 수행하였다[7].

Close-Type 스월 인젝터에 대한 연구는 위에 언급한 것처럼 활발히 진행되고 있으나, 그에 비해 오픈형 스월 인젝터에 대한 연구는 그 수가 적다. 그 이유는 일반적으로 정적인 상태에서의 특성이 Close-Type 인젝터가 더 뛰어나기 때문일 것으로 추측된다. Close-Type 인젝터는 스월 챔버에 비해 오리피스가 더 좁기 때문에 작동유체는 더 큰 각속도를 가지고, 그에 따라 분무각이 커지며 분사 시점에서의 필름 두께가 얇아져 atomization 측면에서 유리하다. 그러나 동특성의 경우 정특성과는 다른 결과가 도출될 수 있으며, 오픈형 스월 인젝터의 동특성을 연구하는 것은 의미 있는 데이터를 제공할 것으로 기대하였다.

본 연구에서는 오픈형 단일 스월 인젝터로 유입되는 작동 유체에 100-1000 Hz의 압력 섭동이 발생할 때, 그 출력 응답 특성을 실험적으로 파악하고자 하였다. 또한 스월 챔버의 길이와 지름을 변화시킴으로써, 스월 챔버의 형상 변화가 인젝터의 동특성에 미치는 영향을 확인하였다.

II. 실험 방법 및 조건

2.1 실험 장치

오픈형 단일 스월 인젝터의 동특성 실험을 수행하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였으며, 작동 유체로 물을 선택하였다. 공기로 물탱크를 가압하는 가압식 분무 방식을 사용하였으며, Canon 7D 디지털 카메라, Canon EF 24-70 mm lens를 이용하여 분무 형상에 대한 사진자료를 수집하였다.

Figure 2와 같은 형상의 인젝터가 설계, 제작되었는데, 스월 챔버의 길이와 지름에 변화를 주어 총 7가지 경우로 제작되었다. 이 수치들은 각 인젝터의 L/D와 Injector geometry parameter 'A'를 기준으로 설정되었는데[6], 타 연구 그룹에서 수행한 연구에 사용된 인젝터와 실제 액체로켓에 적용된 인젝터와 유사한 범위를 만족하도록 결정하였다. 실험 조건은 Table 1과 같다.

압력 섭동을 측정하기 위하여 PCB 사의 102A04, 101M205 동압센서를 매니폴드와 오리피

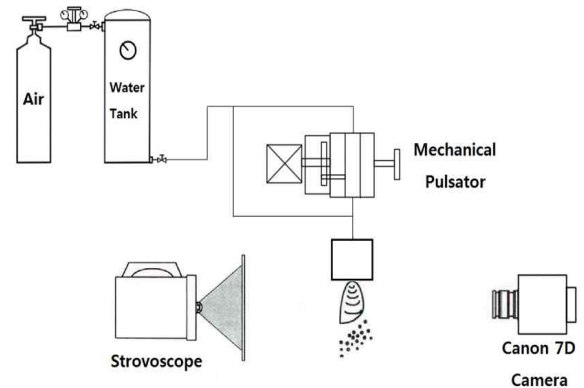


Fig. 1. Schematic of experimental Setup

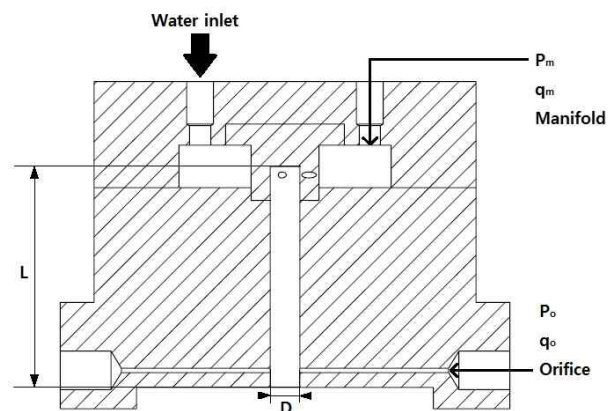


Fig. 2. Structure of Open-Type Swirl Injector

Table 1. Experimental Conditions

Swirl Chamber Diameter (D_{sc})	Swirl Chamber Length (L_{sc})
6 mm	55 mm
7 mm	
8 mm	
9 mm	
7 mm	50 mm
	55 mm
	60 mm
	65 mm
Manifold Pressure	Pulsation Frequency
4 bar	100, 200, 300, 400 500, 750, 1000 Hz

스에 각각 설치하였으며, 같은 위치에서 각각의 정압 또한 측정하여 전압(Total Pressure)을 구하였다. 또한 동압신호의 노이즈를 최소화하기 위하여 PCB사의 Signal Conditioner 482C16 모델을 사용하였다.

2.2 가진 장치 (Mechanical Pulsator)

인젝터 매니폴드로 유입되는 유체에 압력섭동을 발생시키기 위하여 물리적인 직접가진 방식의 가진기가 설계, 제작되었다. 가진기는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 일정 간격으로 20개의 구멍이 뚫린 회전판을 일정한 회전수로 회전시킴으로써 기계적으로 유로의 면적을 변경시키는 방식으로

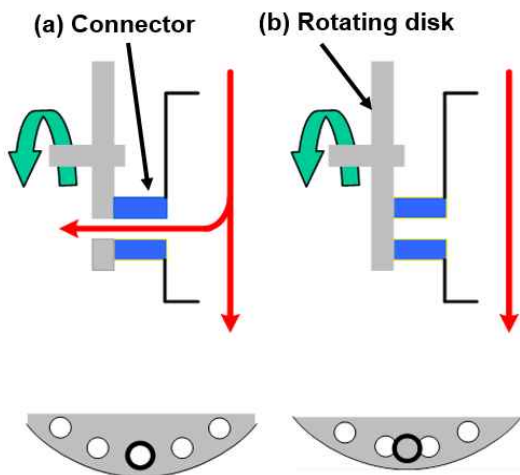


Fig. 3. Schematic of Mechanical Pulsator

설계되었다. 가진기는 (a)커넥터, (b)회전원판 의 두 부분으로 구성되어 있는데, Fig. 3의 좌측 그림과 같이 원판의 구멍과 커넥터의 구멍이 일치하면 물을 배출시켜 압력 강하를 일으키고, 우측과 같이 구멍이 일치하지 않으면 압력을 그대로 보존하는 구조로 이루어져있다. 가진 범위는 최대 1000 Hz이다. 이러한 방식의 가진은 작동 유체에 압력섭동 이외의 다른 영향을 미치지 않는 장점이 있다.

2.3 전극 측정 기법

오리피스에서 분무되는 유체의 액적두께 측정을 위해 Lefebvre가 제안한 전극 방식의 측정기법을 사용하였다 [8,9]. 이 기법은 작동유체가 전기적 전도체임을 이용한 것으로, Fig. 4에 나타난 것과 같이 오리피스 끝에 두 장의 얇은 전극 판을 부착하고 그 사이를 절연체로 차단한다. 두 장의 전극 판 사이의 전기 전도율은 그 사이에 존재하는 액적의 두께에 의해서만 영향을 받기 때문에 이를 이용하여 액적 두께를 계산한다. 전극 판으로는 두께 0.3 mm의 티타늄이 사용되었고, 절연체로는 두께 0.5 mm의 테플론이 사용되었다.

이 측정 기법을 이용함에 있어서, 전극으로 입력하는 전기 신호는 함수발생기를 통하여 진동수 10 kHz, Peak-to-peak magnitude 19.2 V를 유지하였다. 이 수치는 전극을 이용한 액적두께 측정을 처음으로 제안하고 활용한 M.Suyari의 논문에서 참조하였는데[8], 그가 실험에 사용한 값과 유사한 값을 사용함으로써 신뢰성을 확보하고자 하였다. 가진시 확실한 진동 신호를 잡아내기 위해 보유한 함수발생기로 만들 수 있는 가장 큰 진동수와 Peak-to-peak magnitude를 유지했으며,

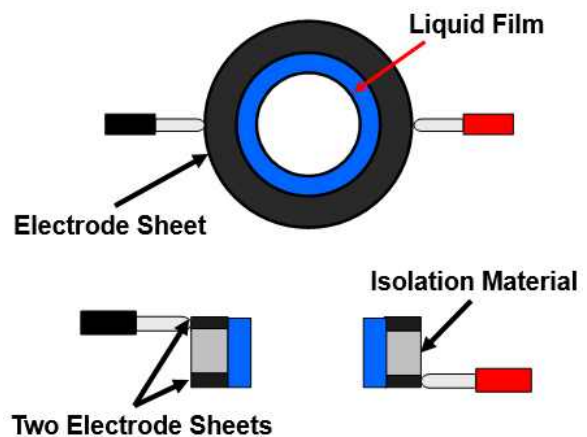


Fig. 4. Schematic of Electric Conductance Method

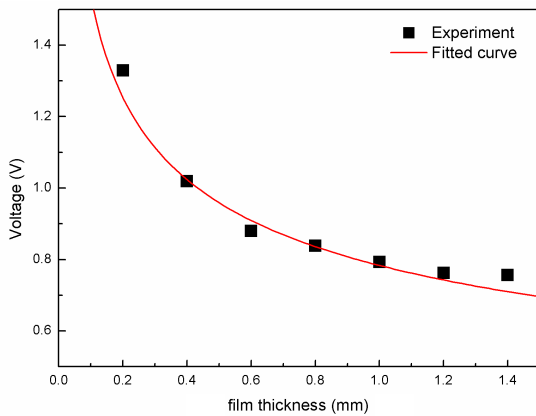


Fig. 5. Calibration plot for liquid film thickness

실험에 앞선 테스트 결과 본 실험에 적용하기에 충분하다고 판단하여 위의 수치를 사용하였다.

수집된 전압 신호를 액막 두께의 값으로 환산하기 위하여 Calibration이 수행되었다. 플라스틱 봉을 절연체로 이용하여 전극장치와 축을 일치시켜 설치한 뒤 하단부를 막고 물을 채워 일정한 필름두께를 유지한 채 전압을 측정하였다. 같은 방식으로 7개의 서로 다른 지름의 절연체를 사용해 실험을 수행함으로써 해당 전극의 필름두께와 그에 따른 전압의 calibration curve를 얻을 수 있었다. 그 중 하나의 예로 Fig. 5에 스윙 챔버 지름 6 mm, 스윙 챔버 길이 55 mm 인젝터의 Calibration Plot을 도시하였다.

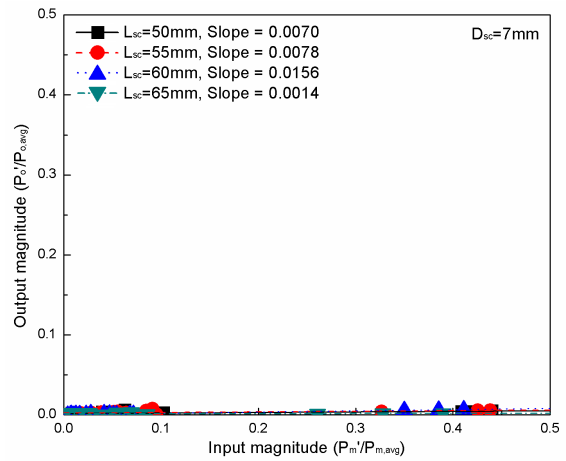
III. 실험 결과

인젝터 매니폴드로 유입되는 유체의 압력 섭동을 입력 변수로 간주할 때, 오리피스 끝에서의 압력과 액막두께가 출력변수로 설정되었다. 매니폴드에서 가진되는 압력의 섭동 크기에 대하여 출력 변수들이 섭동되는 크기를 인젝터 동특성의 주요한 지표로 삼을 수 있다.

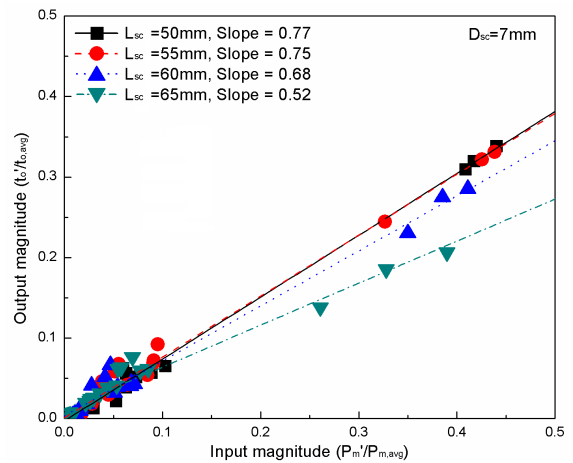
3.1 스윙 챔버 형상에 따른 인젝터 동특성

3.1.1 스윙 챔버 길이의 영향

스윙 챔버의 지름을 7 mm로 고정한 채 스윙 챔버의 길이를 50 mm, 55 mm, 60 mm, 65 mm로 변화하였으며, 스윙 챔버 길이 변화에 따른 응답 특성의 변화를 Fig. 6에 도시하였다. L_{sc} 와 D_{sc} 는 각각 스윙 챔버의 길이와 지름을 나타낸다. (a), (b) 각 그래프의 기울기를 비교함으로써 인젝터에 입력된 압력 섭동에 대한 반응의 크기를 대조적으로 볼 수 있다.



(a) Orifice Pressure



(b) Liquid Film Thickness

Fig. 6. Input gain effects with swirl chamber length variation
 L_{sc} : Swirl chamber length,
 D_{sc} : Swirl chamber diameter

Figure 6 (a)에 나타난 것과 같이, 오리피스 압력의 섭동값은 매니폴드 압력 섭동의 크기에 무관하게 매우 작은 값을 나타내었는데, 이는 모든 길이의 인젝터에서 공통적으로 나타났다.

반면, 액막두께의 섭동값은 입력된 압력 섭동의 크기에 선형적으로 비례하는 경향을 나타내었으며, 스윙 챔버의 길이가 길어질수록 그 기울기가 감소하였다. 즉, 스윙 챔버의 길이가 긴 인젝터의 경우 길이가 짧은 인젝터에 비해 외부 가진에 더 강한 저항을 나타냄을 확인할 수 있다.

이러한 특성은 스윙 챔버 내부 벽면과의 마찰과 가진시 스윙 챔버 내부에 형성된 표면파(Surface wave)의 damping effect에 따른 결과로 보인다. Tangential entry를 통해 스윙 챔버로 공

급되는 액체는, 초기 속도와 압력에 의한 에너지를 가지는데, 그것은 스윙 챔버 내부 표면과의 속도와 진폭으로 나타난다. 오픈형 스윙 인젝터의 경우 지름이 일정한 파이프의 형태이기 때문에 초기에 공급받은 에너지를 증폭시키거나 유지할 수 있는 힘을 전달받을 수 없다. 반면 스윙 챔버 벽면에는 마찰력이 존재하기 때문에 wave를 형성한 액체가 더 긴 스윙 챔버를 따라 이동할수록 에너지 손실이 커지게 되고, 이는 진폭의 감소, 즉 액막두께의 섭동 크기 감소로 이어진다.

3.1.2 스윙 챔버 지름의 영향

스윙 챔버의 길이를 55 mm로 고정한 채 스윙 챔버의 지름을 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm로 변화하였다. 스윙 챔버 지름 변화에 따른 응답 특성의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

스윙 챔버의 길이에 변화를 주었을 때와 마찬가지로, 오리피스 압력의 섭동은 실험이 수행된 모든 영역의 입력변수 가진에 대하여 매우 작은 값을 나타냈다.

액막두께의 섭동값은 입력된 압력 가진의 크기에 비례하는 경향을 보였다. 스윙 챔버의 지름이 클수록 그 기울기가 감소하였는데, 스윙 챔버의 지름이 클수록 외란에 강한 모습을 확인하였다.

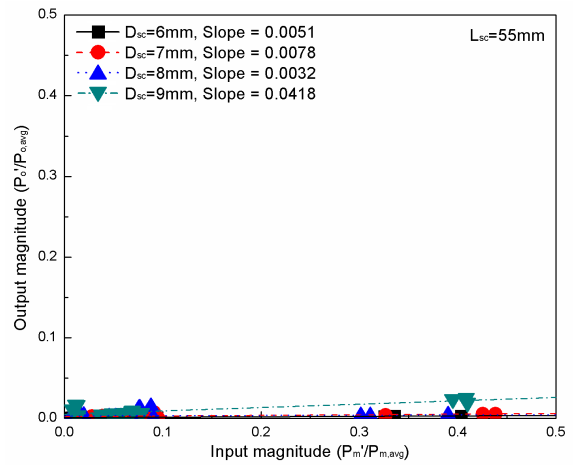
지름이 클수록 기울기가 작아지는 주요한 이유는, 스윙 챔버의 단면적이 커질수록 스윙 챔버에서 압력의 보존이 어려워지고, 따라서 같은 크기의 압력 섭동에 대하여 스윙 챔버의 초기에 형성되는 wave의 진폭이 작아지기 때문이다. 초기에 작은 진폭으로 형성된다면 스윙 챔버 벽면을 따라 진행하면서 진폭이 더 감소하기 때문에 액막 두께의 섭동 크기 역시 작아지게 된다.

3.1.3 오픈형 스윙 인젝터의 응답 특성

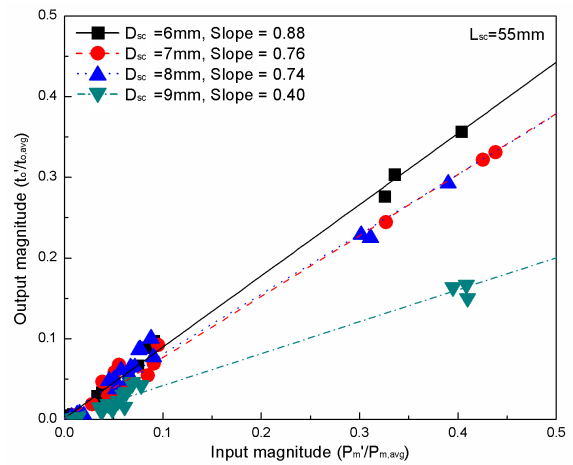
인젝터를 통해서 분무되는 유량의 변화는 액체로켓엔진의 안정성을 결정하는 중요한 인자들 중 하나이다. 외부에서 압력 섭동이 발생했을 때, 이것이 분무되는 유량의 섭동으로 연결되는 구조가 Fig. 8에 나타나있다.

인젝터의 매니폴드에 압력 섭동이 발생하면 스윙 챔버로 유입되는 액체의 속도 섭동을 유발하여 챔버 내부에 surface wave를 형성하고, 이 wave는 오리피스 끝까지 전파되어 액막두께의 섭동을 일으킨다.

한 편, 매니폴드에 발생한 압력 섭동은 그 자체가 스윙 챔버를 통해 오리피스 끝으로 전달되어 오리피스 압력의 섭동을 일으키고, 이 압력 섭동은 인젝터 밖으로 분사되는 액체 분무의 축방향 속도에 섭동을 일으킨다.



(a) Orifice Pressure



(b) Liquid Film Thickness

Fig. 7. Input gain effects with swirl chamber diameter variation
L_{sc} : Swirl chamber length,
D_{sc} : Swirl chamber diameter

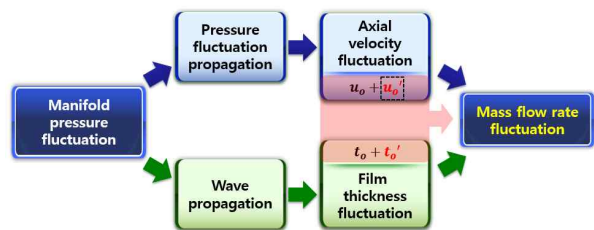


Fig. 8. Simple process of mass flow rate fluctuation being generated

매니폴드에 압력 섭동이 발생하면 위와 같은 방식으로 두 변수의 섭동이 상호작용하며 최종적으로 유량의 진동을 유발한다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 실험에 사용된

오픈형 스월 인젝터에서는 형상 변화에 관계없이 공통적으로 오리피스 압력의 섭동이 매우 작게 발생하였다. 따라서 본 경우에는 인젝터의 유량 섭동을 일으키는 원인으로, 발생한 압력 섭동의 직접적인 전파보다는 스월 챔버 내부에 형성된 surface wave의 전파가 더 주요하다고 해석할 수 있으며, 이러한 사실은 실험에 사용된 인젝터 장치의 고유한 동특성으로, 유량 섭동을 해석함에 있어서 액막두께의 섭동값만을 사용하는 것에 타당성을 제공한다.

3.2 가진 주파수에 따른 인젝터 동특성

가진 주파수에 따른 액막 두께 섭동의 크기를 Fig. 9에 도시하였다. 낮은 진동수 영역에서는 진동수가 증가함에 따라 액막 두께가 급격하게 증

가하였으며, 200 Hz에서 극대점을 가진 뒤 서서히 감소하여 1000 Hz로 갈수록 매우 작은 값을 향해 수렴하는 경향을 보였다. 형상 변화에 대해서는, 스월 챔버의 길이가 길수록, 지름이 클수록 액막 두께의 섭동이 작게 발생하였는데, 이는 앞의 3.1.1, 3.1.2의 결과와 같다.

이 결과는 오픈형 스월 인젝터를 설계하는데 중요한 정보를 제공하는데, 실험에 사용된 오픈형 스월 인젝터들은 특정 진동수 영역 (본 연구의 경우 200 Hz)에서 외부 가진에 특히 취약한 영역이 있다는 것이다.

또한 인젝터의 형상을 변화함으로써 출력되는 섭동의 크기를 조절할 수 있는데, 이러한 특성은 취약 진동수 영역에 노출된 인젝터에 대하여 불안정성을 저감시킬 수 있는 방향성을 제시한다.

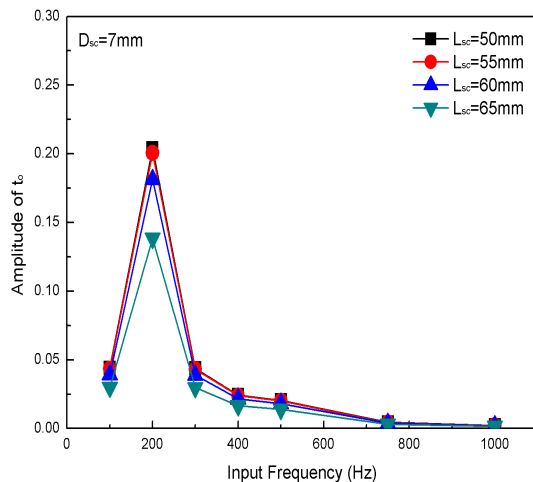
IV. 결 론

오픈형 스월 인젝터의 동특성에 대한 연구를 실험적으로 진행하였다. 입력 변수로써 인젝터의 매니폴드에 압력 가진을 발생시켰고, 그에 따른 출력 변수로 오리피스에서의 압력과 액막두께의 섭동값을 측정하였다. 또한 스월 챔버의 형상 변화가 동특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 스월 챔버의 길이와 지름에 변화를 주었다.

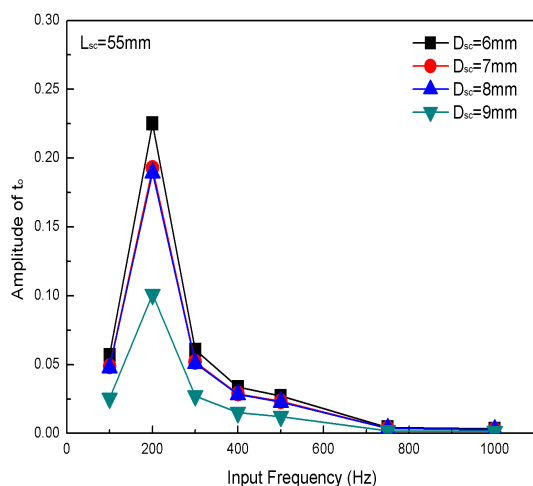
입력된 매니폴드 압력 섭동에 대해 출력되는 오리피스 압력 섭동은 매우 작은 값을 나타내었고, 이 현상은 실험에 사용된 모든 종류의 인젝터에서 공통적으로 나타났다. 이를 통해 인젝터에서 분사되는 분무 유량에 불안정을 야기하는 원인으로, 압력의 직접적인 전달보다는 스월 챔버 내부에 형성된 surface wave의 전파가 더 큰 영향을 미치는 것으로 파악된다.

오리피스 압력이 나타내는 현상과는 달리, 오리피스 끝에서 액막두께의 섭동은 그 크기가 입력된 섭동 크기에 선형적으로 비례하여 증가했다. 스월 챔버의 형상에 변화를 주었을 때, 길이가 길어질수록, 지름이 커질수록 기울기가 작아지는 경향을 보였다. 즉, 스월 챔버의 길이가 길수록, 지름이 클수록 외부에서 유입된 섭동에 더 강한 저항을 나타내는 것을 확인하였다.

마지막으로, 입력되는 압력 가진의 주파수에 따라 출력되는 액막두께 섭동의 크기를 그래프로 나타내었다. 낮은 주파수 영역에서는 그 크기가 급격하게 증가하였고, 200 Hz에서 최대값을 나타낸 뒤 점차 감소해 1000 Hz에 근접할수록 매우 작은 값으로 수렴하였다. 이 결과로 실험에 사용된 오픈형 스월 인젝터가 특정 진동수의 외



(a) Swirl Chamber Length Variation



(b) Swirl Chamber Diameter Variation

Fig. 9. Effect of pulsation frequency on the amplitude of liquid film thickness

란에 취약한 모습을 나타내는 것을 확인하였으며, 인젝터의 형상 변화를 통해 그 크기가 변화함을 확인하였다. 단, 실험에 사용된 모든 경우의 스윙 챔버 지름과 길이에 대하여 극대점의 위치는 200 Hz로 동일하였기에, 실험에 사용된 영역에 한하여 스윙 챔버의 지름과 길이는 인젝터의 공진주파수 자체에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 다만 200Hz에서 극대점이 나타나는 원인을 본 실험의 결과로는 파악할 수 없었고, 따라서 인젝터 형상에 대한 또 다른 파라미터들을 변수로 하는 후속연구가 필요하며, 그 결과에 따라 외란에 취약한 주파수 영역을 결정하는 인자를 찾아내는 것을 기대할 수 있을 것이다. 또한 차후에 hot test에 대한 연구를 진행함으로써 연소중에 일어나는 불안정 현상에 대하여, cold test에서 나타나는 동특성이 hot test의 고온상황에서 어떻게 나타나는지 고찰해 볼 수도 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원을 통한 한국연구재단의 지원(NRF-2011-220 - D00023) 및 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원과 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터 지원사업(No. 2013073861)의 연구 결과입니다.

Reference

- 1) Joseph C. Oefelein and Vigor Yang, "Comprehensive Review of Liquid-Propellant Combustion Instabilities in F-1 Engines", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, 1993, pp. 657-677
- 2) Roger E. Bilstein, "Stages to Saturn", NASA SP-4206, NASA History Office, 1996.
- 3) Benjamin Ahn, Maksud Ismailov and Stephen D. Heister, "Experimental Study Swirl Injector Dynamic Response Using a Hydromechanical Pulsator", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 28, No. 3, 2012, pp. 585-595
- 4) Brian R. Pomeroy, Collin Morgan and William E. Anderson, "Response of a Gas-Centered Swirl Coaxial Injector to Transverse Instabilities", 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit
- 5) Kevin Miller, James Sisco, Nicholas Nugent and William Anderson, "Combustion Instability with a Single-Element Swirl Injector", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 5, 2007, pp1102-1112
- 6) Vladimir G. Bazarov and Vigor Yang, "Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, 1998, pp. 797-806
- 7) Taeock Khil, Yunjae Chung, Vladimir G. Bazarov and Youngbin Yoon, "Dynamic Characteristics of Simplex Swirl Injector in Low Frequency Range", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 28, No. 2, 2012, pp. 323-333
- 8) M. Suyari and A.H. Lefebvre, "Film Thickness Measurements in a Simplex Swirl Atomizer", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 2, No. 6, 1986, pp. 528-533
- 9) Sunghyuk Kim, Taeock Khil, Dongjun Kim and Youngbin Yoon, "Effect of geometric parameters on the liquid film thickness and air core formation in a swirl injector", *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 1, 2009, 015403